干旱区地理
ARID LAND GEOGRAPHY

基于WRF模拟的2017年帕米尔高原降水特征分析

张　茜，　段克勤

（陕西师范大学地理科学与旅游学院，陕西　西安　710119）

摘　要：帕米尔高原是中亚最重要的水源地，但因其较高的海拔导致降水数据极其缺乏，限制了对帕米尔高原大气降水和水文过程的认识。为认知帕米尔高原降水的空间分布，使用WRF（Weather research and forecasting）模式，以6 km的高分辨率模拟了2016年12月至2017年11月帕米尔高原大气降水的时空分布，模拟结果揭示了帕米尔高原高大地形对水汽输送的阻滞作用，造成帕米尔高原各季节降水主要分布在迎风坡上。在冬季和春季，降水主要发生在帕米尔高原西侧迎风坡，降水整体上随海拔的升高而增大，降水区集中在海拔3000~5000 m处，高海拔地区降水量高出平原地区数倍之多。而夏季降水主要出现在帕米尔高原的南麓，因高原的阻挡，夏季风不能深入到高原内陆，造成夏季高原顶部降水量不足100 mm。

关 键 词：降水；WRF；高海拔；帕米尔高原

文章编号：

帕米尔高原（71°~76°E，35°~40°N）地处青藏高原西缘，是昆仑山、喀喇昆仑山、兴都库什山和天山交汇的巨大山结，面积约10100 km^2，是印度河、阿姆河、塔里木河、叶尔羌河、喀什噶尔河等众多河流的发源地[1-3]。帕米尔高原的大气降水和冰川积雪消融为周边河流提供了超过50%的径流来源[4-6]，其对中亚的水资源起着至关重要的作用[7]。因此帕米尔高原不仅是我国西部地区的“湿岛”，也被称为“中亚水塔”[8]。

中亚地区水资源日益紧张[9]，如何合理利用好帕米尔地区有限的水资源，一个重要的前提是对帕米尔高原大气降水的空间变化有充分的认识。然而，目前对帕米尔高原大气降水的相关研究文献欠缺，对降水的时空变化特征及其变化机理研究也不足，主要是因为帕米尔高原海拔下垫面复杂，有限的气象站分布在海拔较低的河谷地带，且空间分布很不均匀。帕米尔高原主体海拔超过4500 m，因海拔较高（图1），海拔4000 m以上地区几乎没有降水观测资料，导致对帕米尔高海拔地区的降水变化并不十分了解。

单靠目前的观测数据不能得到帕米尔高原降水空间分布特征，对全面认识帕米尔地区大气降水及其水资源十分不利。为克服观测资料的不足，近年来利用再分析资料及插值的降水格点数据，分析发现帕米尔高原受西风带影响[10-11]，冬季和夏季的平均降水分布差异很大[12-13]，冬春季节降水多于夏秋季节[14-16]。但这些资料的分辨率多在25~100 km[8,17-19]，而帕米尔高原地形复杂，过粗的分辨率不能刻画降水的空间分布，同时也难以刻画降水随地形的变化。

因为缺乏高分辨率的大气降水资料，目前在帕米尔高原，对大气降水的时空变化认识仍不充分。如在帕米尔高原，大气降水随海拔高度是如何变化的？受西风带影响的帕米尔高原西部，与受季风影响较大的南部相比，其降水特征有什么不同？这些问题的回答是认识帕米尔高原降水及其对水资源影响的重要前提。针对以上问题，本研究的目的是利用WRF（Weather research and forecasting）模式，以

收稿日期：2021-01-12；　**修订日期**：2021-09-17

基金项目：国家自然科学基金项目（41571062）和第二次青藏高原科考项目（2019QZKK0201）资助

作者简介：张茜（1997-），女，硕士研究生，主要从事区域气候变化数值模拟研究. E-mail: zhangqian18@snnu.edu.cn

通讯作者：段克勤（1970-），男，教授，主要从事全球变化研究. E-mail: kqduan@snnu.edu.cn

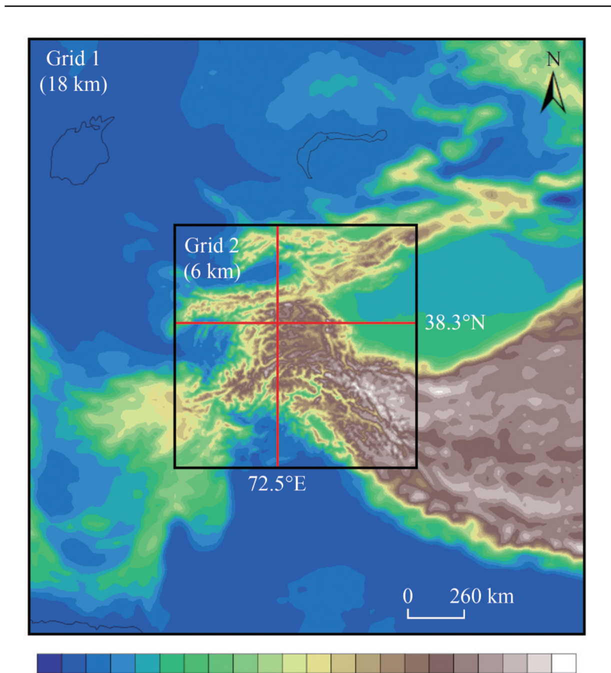


图1 模拟实验区及地形分布

Fig. 1 Simulation experiment area and terrain distribution

6 km的高分辨率，模拟帕米尔高原2016年12月至2017年11月的大气降水变化，以弥补地面观测的不足，为全面认识帕米尔高原的降水和水资源变化奠定科学基础。

1 数据与方法

WRF（Weather research and forecasting）模式是美国国家大气研究中心（NCAR）开发的新一代中尺度数值天气预报系统，该模式能够克服再分析资料分辨率太粗，难以捕捉复杂地形下降水模式的弊端，是研究天气和气候变化的重要工具[20–22]。

1.1 数据

考虑到气象站点分布稀疏且地处海拔整体较低，很难与高原地形匹配，故采用ERA5（European Centre for Medium-Range Weather Forecasts Reanalysis v5）资料和CPC（Climate Prediction Center）格点降水数据与WRF模拟结果进行对比分析，相互验证不同降水资料的可靠性。ERA5是ECMWF（European Centre for Medium-Range Weather Forecasts）提供最新的第五代再分析资料（https://www.ecmwf.int），其水平分辨率为0.25°×0.25°，垂直层数为137级的每小时分析数据。CPC是由17000余个台站数据通过插值得到的空间分辨率为0.5°×0.5°的逐日降水格点数据（https://climatedataguide.ucar.edu），本研究使用CPC数据对WRF模拟结果进行验证。该数据具有高站密度的优势，质量控制是通过与历史记录的比较和附近站测量的独立信息、并发雷达/卫星观测以及数值模型预测来执行的，以站点插值创建考虑地形效应的每日降水场[23]，其在中亚帕米尔地区有着较好的适用性[24–25]。等高线数据使用90 m分辨率的DEM（Digital elevation model）数据。

WRF模式初始和边界场资料来自美国国家环境预报中心（National Centers for Environmental Prediction，NCEP）和国家大气研究中心（National Center for Atmospheric Research, NCAR）全球再分析FNL资料，该资料水平分辨率为1°×1°，时间间隔为6 h。研究区域以WRF模式模拟的内层嵌套区Grid 2为范围，经纬度范围约为（32°~42°N，67°~80°E），下文讨论中涉及的研究区均以此为参照。

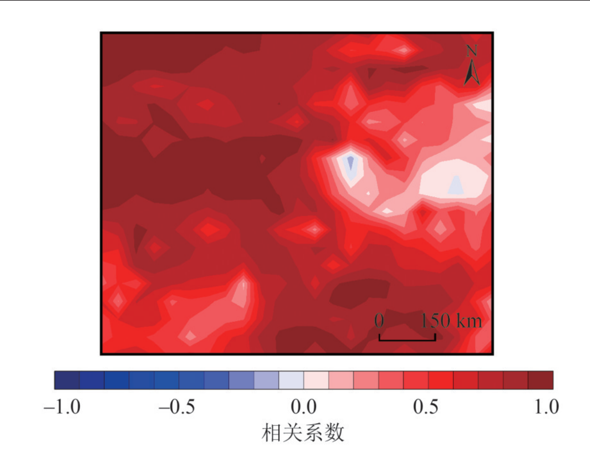
1.2 方法

本研究使用WRF V3.8.1版本，模拟时段为2016年10月1日00:00到2017年12月1日00:00，前2个月的输出作为预热期（Spin up）不作讨论，仅讨论2016年12月至2017年11月的降水数据。WRF参数化方案选用WSM6微物理过程、BMJ积云参数化、MYJ边界层、CAM辐射和Noah陆面过程，投影方式为Lambert。该参数化方案组合在天山地区降水的模拟研究中体现出较好的适用性，该套方案对四季降水的模拟都有一定的稳定性[26]。模拟区域采用双重网格嵌套，网格中心点为（38°N，74°E），相应的水平网格距分别为18 km（Grid 1），6 km（Grid 2）（图1），垂直方向分为50层。

2 结果与分析

2.1 模拟结果验证

CPC数据源于全球气象台站观测数据，本文使用该数据集对WRF模拟结果进行验证。使用双线性插值方法将WRF模拟结果插值到和CPC数据一致的0.5°×0.5°的分辨率，进行空间相关性分析，得到2016年12月至2017年11月降水量两套数据相关性结果，如图2所示。发现WRF模拟结果和观测降水的空间分布有很高的一致性，其中相关性较低的部分主要位于高原东侧的塔里木盆地，在公格尔



注：正值为正相关；负值为负相关；绝对值越大相关性越强。

图2　WRF模拟与CPC降水数据的空间相关性

Fig. 2　Spatial correlation between WRF simulation and CPC precipitation data

山区域还出现了弱负相关。这2个现象可能是由于塔里木盆地地区常年少有降水，变化波动微弱，公格尔山山峰处海拔超过7000 m，低分辨率的数据可能无法反映局部极高海拔降水特征。

2.2　帕米尔高原降水空间分布特征

为讨论帕米尔高原不同季节降水的空间分布特征，结合3000 m等高线，将降水数据按照冬季（12—2月）、春季（3—5月）、夏季（6—8月）和秋季（9—11月）划分进行分析。

图3对比了CPC格点、ERA5再分析和WRF模拟降水数据在不同季节的空间分布，3套数据所揭示的降水空间格局基本一致，整体上表现出高海拔地区降水远大于低海拔地区的特点，由于分辨率的不同，造成降水分布的细节有显著差异。CPC数据的空间分辨率约为50 km，ERA5数据分辨率约为25 km，而WRF模拟数据分辨率达到6 km。同CPC和ERA5数据相比，WRF模拟的降水空间变化更加细致，充分反映了地形剧烈起伏引起的降水空间分布差异。CPC数据由于分辨率较粗，平滑掉了降水的空间差异性，另一方面CPC的格点数据主要由分布在平原地区的台站资料插值得到，在高海拔地区存在较大的误差，造成CPC存在低估降水量尤其是

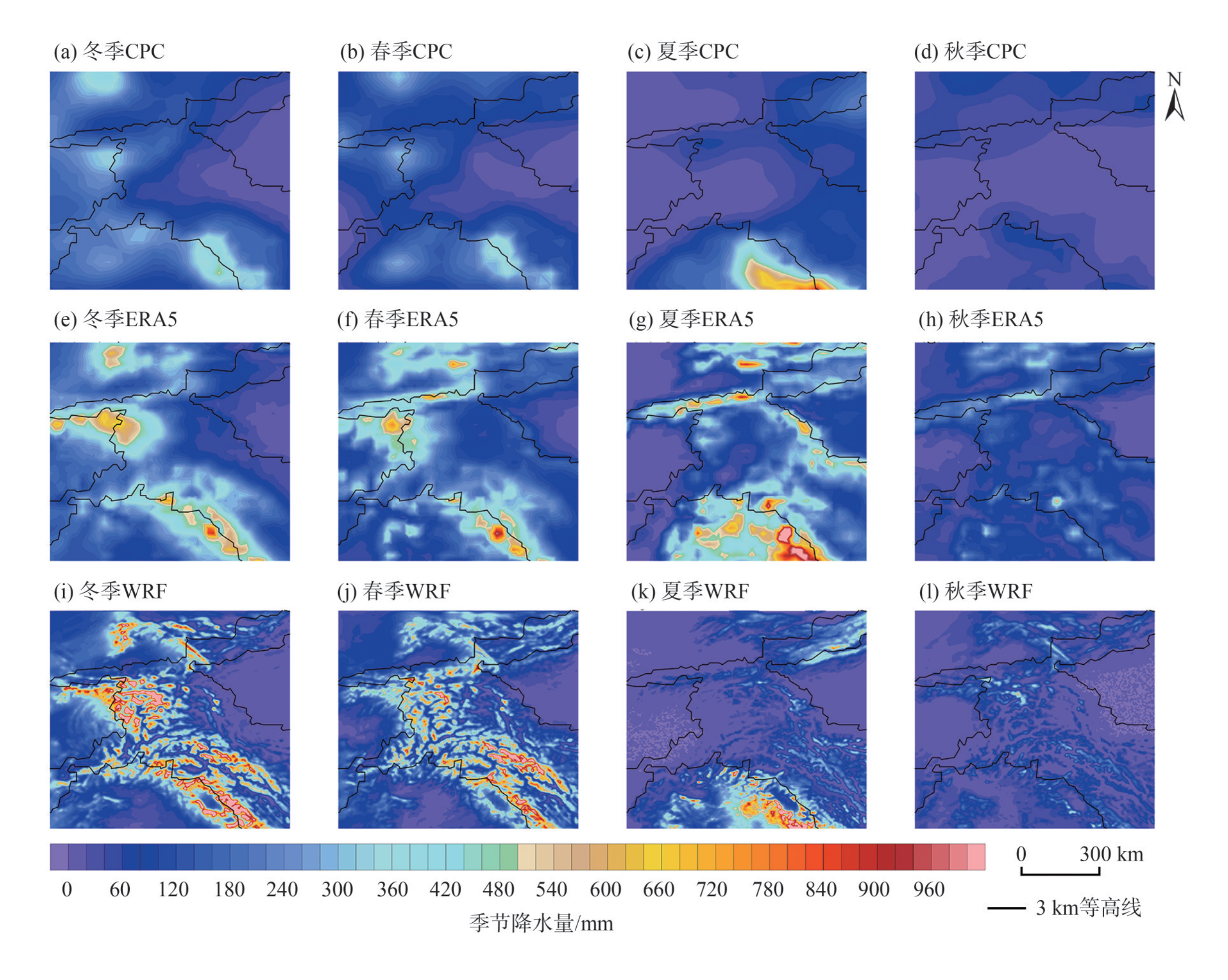


图3　CPC、ERA5与WRF模拟2017年四季降水量的空间分布

Fig. 3　Spatial distribution of precipitation based on CPC, ERA5 and WRF in each season of 2017

低估冬季降水量的情况[24]。相比较，从降水量的数值和降水的空间分布上，ERA5数据与模拟值更加接近，但仍然没有体现出降水随地形剧烈起伏所造成降水的差异性。

在帕米尔高原地区，冬季产生2个较为显著的降水中心，分布在以(33°N，75°E)为中心跨度约为2°的南降水中心(喜马拉雅山脉西南缘)和分布在距38°N纬线南北两侧跨度约为2°的北降水中心(帕米尔高原西侧)，整体以37°N纬线和73°E经线为界；结合3000 m等高线可见，冬季的降水中心均位于山体的西南侧迎风坡。春季3套数据的降水中心未发生明显移动，其范围及最大降水量级较冬季有明显缩减，降水中心主要分布在山体西南侧迎风坡，这表明山地对降水的空间分布有显著的影响。夏季，3套数据显示研究区南侧降水中心出现明显南移且向西部平原延伸，研究区北侧未出现统一降水中心，天山东侧即塔里木盆地西侧边缘山区出现部分降水点。秋季为中亚地区的旱季少有降水，帕米尔高原地区未出现明显降水片区。

图3中的3套降水数据都揭示出研究区冬季存在2个降水中心，分别为帕米尔高原西部和喜马拉雅山脉西南缘。受盛行西风和高大地形的影响，冬季降水在帕米尔高原西部要大于东部。相比冬季，春季帕米尔高原上高降水区域减少，仅喀喇昆仑山地区呈现降水高值区。夏季在季风作用下，研究区夏季降水高值仅出现在喜马拉雅山脉西南缘，其余地区降水较冬、春季显著减少。在秋季，研究区整体降水量远小于其他三季，呈现出少雨的特征。

中亚地区整体受盛行西风带的控制，影响水汽分布的主要环流系统包括南亚季风和中纬度西风[27]。中亚山区的水汽主要依赖于中高纬西风的输送[18]，喜马拉雅山的降水主要受南亚地区季风影响[28]。帕米尔高原上空整体受到北半球中纬度盛行西风控制，受到青藏高原地形的阻挡作用，西风气流被分为了南北两支，北支—西南风流经帕米尔高原，为其输送来自黑海、里海和地中海的水汽。冬季，青藏高原南侧季风环流微弱，强劲的西风向帕米尔高原输送水汽，在迎风坡地区受地形抬升作用，为冬季降水提供条件。夏季，帕米尔高原西侧的里海水体表面为地表冷源，里海上空形成季节性反气旋[29]，反气旋截断了西风的输送，帕米尔高原受到反气旋东侧干旱的大陆性气流影响，持续少雨。由此产生冬、夏季节降水的巨大差异。

在西风的影响下，冬春季节帕米尔高原的北降水中心集中分布在西北迎风坡地区，南降水中心呈条状自西向东沿山脉走向延展。山区降水不仅与大气环流密切相关，也受制于诸如山脉走向、海拔高度、坡向、坡度以及水汽含量和大气层结稳定度等多种因素，造成降水过程及空间变化非常复杂。对于像帕米尔高原这样复杂的地形，需要高分辨率的降水资料来揭示降水的空间变化。对比不同分辨率的数据，图3中高分辨率的WRF模拟降水数据，更能反映了帕米尔高原降水空间变化的精细结构。在WRF模拟的结果中发现，帕米尔高原的降水中心是由逐个山峰处的小型降水中心共同组成的，而非均匀成片分布在迎风坡的山麓地区。帕米尔高原是层层起伏的山峰组成的台状高原，这一降水分布现象更符合地形强迫对降水空间分布的作用结果，即受到地形的抬升作用，水汽在各个山峰的迎风坡处形成降水。格点数据和再分析资料都低估了地形强迫作用，无法反映出高原内部山峰处的降水中心，WRF模式能够精细反映复杂地形下的降水空间分布。

图4可以看出，3套数据均表现出各季节降水量占比的空间差异性。帕米尔高原东西两侧分别表现为低比例的冬季降水量和高比例的冬季降水量，WRF和CPC数据揭示73°E以西的西帕米尔高原和平原地区，有40%的降水发生在冬季，夏季降水量占比不到10%，这反映了帕米尔西部存在显著的冬季降水特征。3套数据都指示喜马拉雅山脉西南缘地区，因受夏季风影响，夏季降水占比可达到60%，显示明显的夏季降水特征。3套数据在塔里木盆地和昆仑山交界的边缘区域降水主导季节产生了差异，CPC和ERA5数据表明该处的降水主要产生于夏季，WRF模拟的结果显示其降水主要产生于春季。考虑到使用WRF模式选用参数化方案时更侧重于山区降水的重现，对于塔里木盆地降水的分布可能出现一定偏差。

2.3 帕米尔高原降水量随海拔的变化

高大山脉对水汽输送具有明显的阻隔作用，进而影响山区降水的空间分布格局，海拔是影响降水空间分布差异的重要地形因子。为揭示帕米尔高原降水随地形的变化特征，图5和图6分别显示了图1中沿38.3°N纬线和72.5°E经线的剖面，以揭示

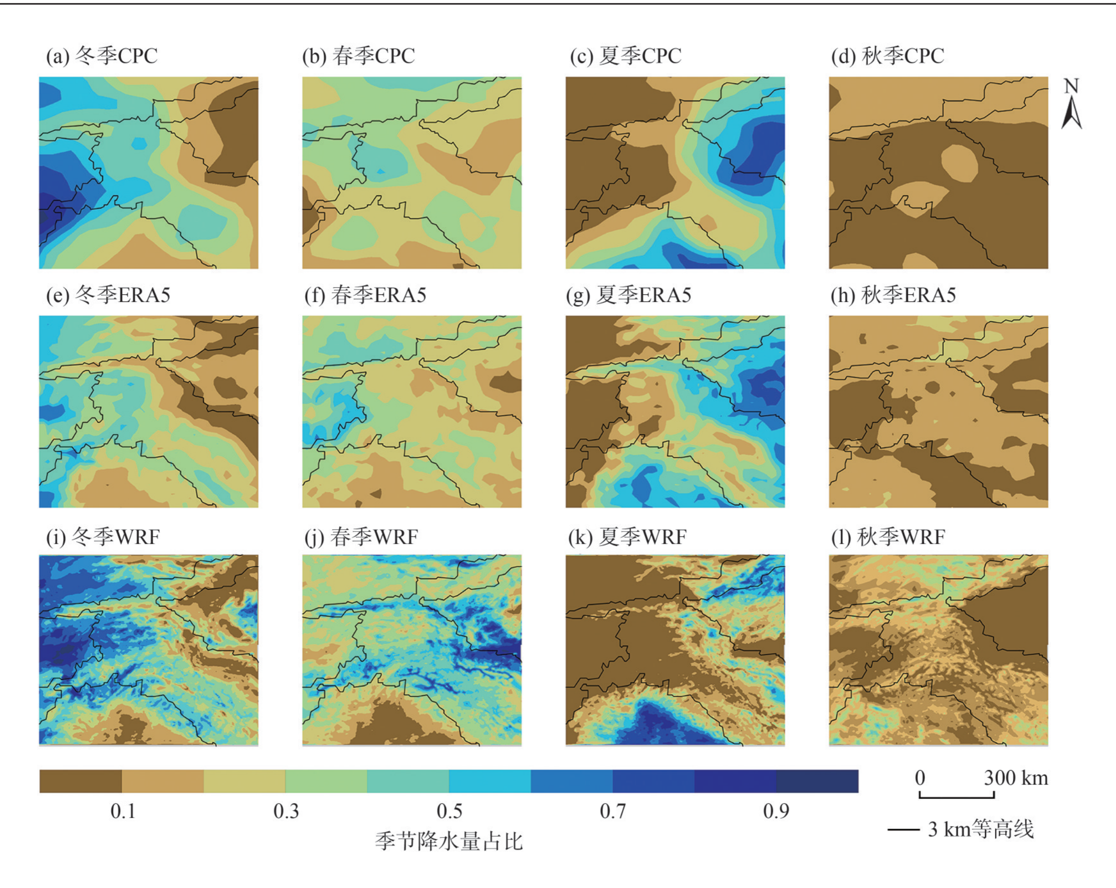


图4　CPC、ERA5和WRF模拟四季降水量占比的空间分布

Fig. 4　Proportion spatial distribution of precipitation based on CPC, ERA5 and WRF in each season

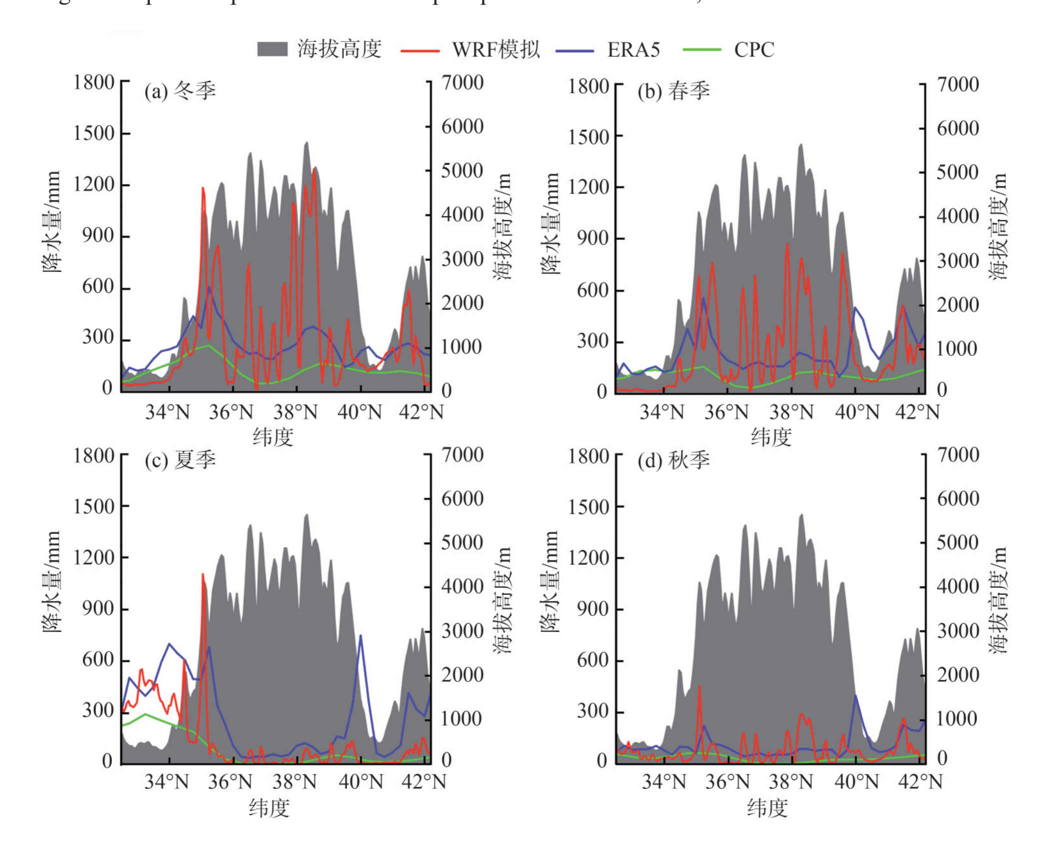


图5　沿38.3°N纬向剖面的要素分布

Fig. 5　Elements distribution of the latitudinal section

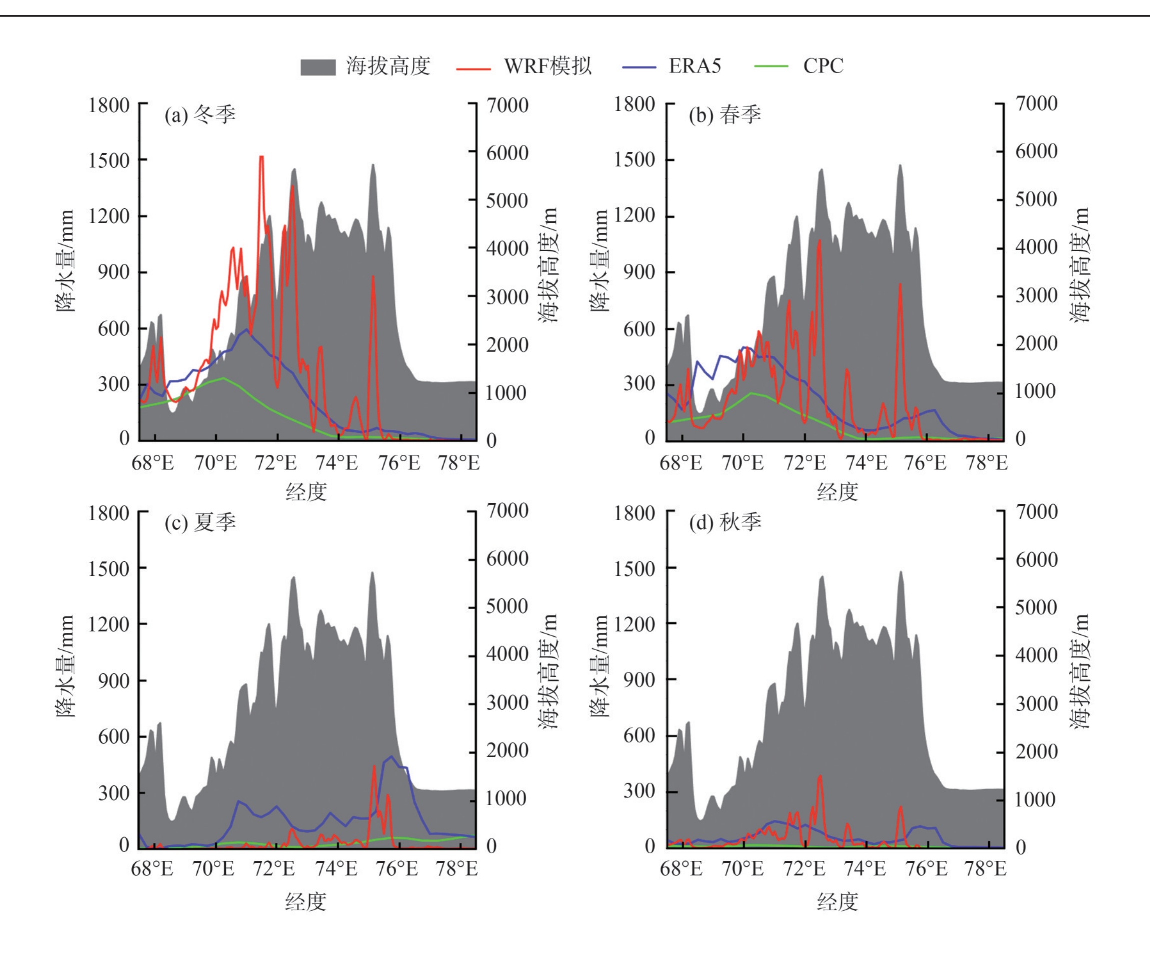


图6 沿72.5°E经向剖面的要素分布

Fig. 6 Elements distribution of the longitudinal section

3套降水数据随地形的变化。地形数据来自WRF模式内部输入地表数据。

由图5可见,CPC、ERA5和WRF在纬向剖面的降水量随地形的分布是相似的,但细节差异较大,主要是由于WRF的高分辨率模拟使得降水数据更加精细,能够刻画降水随地形海拔的细微变化,随着分辨率的不断降低,ERA5和CPC降水数据只能揭示降水随地形变化的轮廓,不能指示降水随地形的变化细节。

图5a显示在冬季,WRF模拟出的雨峰雨谷基本上与山峰山谷一一对应,在帕米尔高原西侧迎风坡降水随海拔升高而增加,高原西侧降水远大于东侧。在高原西侧迎风坡海拔3000~5000 m处出现了3个降水高值区,在71.4°E海拔约4400 m处出现最大降水带,冬季降水量最高可达到1200~1500 mm,在72°E海拔约5000 m处出现次最大降水带,降水量可达1200 mm。与此相比,在高原面上降水量迅速减少,在高原东部75.3°E处慕士塔格峰出现降水量的另一高值中心,冬季降水量约为800 mm。再往东,随着海拔的急剧下降,降水量也急剧减小,高原东侧的塔里木盆地,冬季降水量则不到20 mm。与WRF模拟值相比,CPC降水数据揭示冬季降水量峰值出现在70°E海拔2000 m处,最大降水量为300 mm。而EAR5降水数据为71°E海拔3000 m处,最大降水量为600 mm。可见,随着分辨率的降低,最大降水量的量级迅速减小,这是由于较低分辨率对空间平滑结果造成的。春季降水量与冬季类似(图5b),但春季降水量整体上比冬季降水量减少。夏季,由于西风带的北移,流经帕米尔北部地区的气流属于大陆性干旱气流,在迎风坡未形成明显降水,但在高原东侧(75°~76°E)形成约300 mm的降水峰值,造成这一现象是由于夏季的塔里木盆地上方存在一个局地环流(WRF模拟结果,未展示),气流随山地地形抬升,有利于在山坡处形成降水(图5c)。秋季,西风较夏季增强,降水主要发生在海拔大于3000 m的迎风坡,降水量峰值出现在帕米尔高原东西两侧的山峰处,由于此时水汽输送弱于春季[30],故秋季局部最大降水量仅为400 mm。

图6为沿72.5°E经线降水量随地形的变化。冬季，沿72.5°E经向剖面，3套数据都显示在35°N和38.5°N处存在2个降水中心，最大降水量1300 mm出现在38.5°N海拔5000 m处。春季与冬季类似，但降水量减小。图6c揭示在夏季，由于帕米尔高原地区西风带减弱，夏季风增强，增强的夏季风主要表现在喜马拉雅山西部的山麓，造成迎风坡降水量增大，夏季降水量峰值出现在35°N海拔4200 m处，可达1100 mm。夏季低纬湿润气流受山体阻隔，高原腹地夏季降水量显著小于冬春季。秋季，降水主要发生在高海拔地区，降水量远比冬春季小。

在帕米尔高原的冰川区，年降水量最高可达2000 mm[31]。发源于帕米尔高原的阿姆河中上游地区年降水量可以达到3000 mm[32]，与本文的研究结果较为一致，但是对比观测的CPC格点数据和ERA5再分析资料，WRF模拟的局部降水量存在偏高的情况。帕米尔高原地势陡峭，海拔起伏大，WRF模式模拟过程中，局部地形的迅速抬升使得水汽快速凝结，因此产生了局部较高的模拟降水量。总体来看，山区降水量随海拔升高具有明显的变化规律，中亚地区主要山区的降水量遵循随海拔高度的升高而递增的规律[33-34]。根据剖面图发现，帕米尔高原整体符合降水量随海拔的升高而递增的变化规律。帕米尔高原处于盛行西风带的环流系统，来自大西洋、地中海、里海和黑海的湿润水汽受到山脉和高原的拦截，被迫随地形抬升凝结产生降水，在帕米尔高原西侧的迎风坡形成较为丰沛的降水。

3　讨　论

帕米尔高原以其高大的地形对水汽输送和降水造成重大影响，降水格点数据和再分析资料低估了该地区的地形降水，WRF模式能精细地反映出复杂地形下降水的空间分布特征。还原了帕米尔高原的2个降水中心，还揭示了帕米尔高原降水量随海拔变化逐渐增加的变化规律，印证了数据分辨率对探究复杂地形降水应用中的重要性。对比分析CPC、ERA5和WRF 3套数据在帕米尔高原的表现，认为WRF模式对高原山区降水具有良好的模拟能力[35-37]，帕米尔高原降水量的模拟结果与已有研究结论的量级一致。

WRF模拟结果分辨率较高，能够比粗分辨率的再分析资料更准确的模拟出复杂地形条件下降水的空间分布，但是高海拔山区降水事件和量级的模拟还存在不确定性。其误差产生的原因主要有：一是WRF模式对中小尺度地形抬升作用的描述过强[38]，加强了地形对水汽的抬升作用，导致在山峰地区产生了高降水模拟值。二是山区气象观测站点空间分布极为不均，且多分布在平坦的河谷地区，其观测数据对其周围区域的代表性还需要进一步验证[39-40]。后期气候模拟研究中需考虑如何将格点代表性误差最小化，还需根据研究区实际情况考虑调整方案内部的运算框架。

本文讨论了帕米尔高原地区2017年的降水时空分布特征，为提高帕米尔高原降水变化的认识、以及水资源的合理利用和自然灾害防御能力提供了理论支撑。尽管WRF模式能较好的模拟帕米尔高原降水的时空分布特征，但还缺乏对降水时空变化长时间尺度的研究，以及变化机理的揭示，未来仍要加强对帕米尔高原地区降水模拟工作。随着中国各项科考项目的推进，帕米尔高原以及青藏高原地区的气象观测网络将更加完善，数据更加丰富，有望对问题进行更加深入的探讨。

4　结　论

（1）春季和冬季降水量对该年降水量的贡献最大，是主要降水季节。在冬季和春季，降水主要发生在帕米尔高原西侧迎风坡。

（2）降水量整体上随海拔的升高而增大，降水区主要在海拔3~5 km处，高海拔地区的降水量是低海拔处的数倍之多。

（3）夏季降水主要出现在帕米尔高原的南坡，因高原的阻挡，夏季风不能深入到高原内陆，造成夏季高原顶部降水量可能不到100 mm。

参考文献（References）

[1] Immerzeel W W, Lutz A F, Andrade M, et al. Importance and vulnerability of the world's water towers[J]. Nature, 2020, 577(7790): 364-369.

[2] Pohl E, Knoche M, Gloaguen R, et al. The hydrological cycle in the high Pamir Mountains: How temperature and seasonal precipitation distribution influence stream flow in the Gunt catchment, Tajikistan[J]. Earth Surface Dynamics Discussions, 2014, 2(2): 1155-1215.

[3] 易颖, 刘时银, 朱钰, 等. 2002—2018年叶尔羌河流域积雪时空变化研究[J]. 干旱区地理, 2021, 44(1): 15-26. [Yi Ying, Liu Shiyin, Zhu Yu, et al. Spatiotemporal variation of snow cover in the Yarkant River Basin during 2002—2018[J]. Arid Land Geography, 2021, 44(1): 15-26.]

[4] Lutz A F, Immerzeel W W, Kraaijenbrink P D, et al. Climate change impacts on the upper Indus hydrology: Sources, shifts and extremes[J]. PLoS One, 2016, 11(11): e0165630, doi: 10.1371/journal.pone.0165630.

[5] Mukhopadhyay B, Khan A. A reevaluation of the snowmelt and glacial melt in river flows within upper Indus Basin and its significance in a changing climate[J]. Journal of Hydrology, 2015, 527 (1): 119-132.

[6] Messerli B, Viviroli D, Weingartner R, et al. 世界山地: 21世纪脆弱的"水塔"[J]. AMBIO-人类环境杂志, 2004(增刊1): 30-34, 57. [Messerli B, Viviroli D, Weingartner R, et al. The mountains of the world: The fragile "Water Tower" in the 21st century[J]. AMBIO-Journal of the Human Environment, 2004(Suppl. 1): 30-34, 57.]

[7] Immerzeel W W, Bierkens M F P. Seasonal prediction of monsoon rainfall in three Asian river basins: The importance of snow cover on the Tibetan Plateau[J]. International Journal of Climatology, 2010, 30(12): 1835-1842.

[8] Pohl E, Gloaguen R, Seiler R. Remote sensing-based assessment of the variability of winter and summer precipitation in the Pamirs and their effects on hydrology and hazards using harmonic time series analysis[J]. Remote Sensing, 2015, 7(8): 9727-9752.

[9] 郝海超, 郝兴明, 花顶, 等. 2000—2018年中亚五国水分利用效率对气候变化的响应[J]. 干旱区地理, 2021, 44(1): 1-14. [Hao Haichao, Hao Xingming, Hua Ding, et al. Response of water use efficiency to climate change in five Central Asian countries from 2000 to 2018[J]. Arid Land Geography, 2021, 44(1): 1-14.]

[10] 陈发虎, 陈建徽, 黄伟. 中纬度亚洲现代间冰期气候变化的"西风模式"讨论[J]. 地学前缘, 2009, 16(6): 23-32. [Chen Fahu, Chen Jianhui, Huang Wei. Discussion on the "westerly model" of mid-latitude Asian modern interglacial climate change[J]. Earth Science Frontier, 2009, 16(6): 23-32.]

[11] 蒋宗立, 王磊, 张震, 等. 2000—2014年喀喇昆仑山音苏盖提冰川表面高程变化[J]. 干旱区地理, 2020, 43(1): 12-19. [Jiang Zongli, Wang Lei, Zhang Zhen, et al. Surface elevation changes of Yengisogat Glacier between 2000 and 2014[J]. Arid Land Geography, 2020, 43(1): 12-19.]

[12] 陈发虎, 黄伟, 靳立亚, 等. 全球变暖背景下中亚干旱区降水变化特征及其空间差异[J]. 中国科学: 地球科学, 2011, 41(11): 1647-1657. [Chen Fahu, Huang Wei, Jin Liya, et al. Spatiotemporal precipitation variations in the arid Central Asia in the context of global warming[J]. Scientia Sinica (Terrae), 2011, 41(11): 1647-1657.]

[13] Bai Y Q, Wang J L, Wang Y J, et al. Spatio-temporal distribution of drought in the Belt and Road Area during 1998—2015 based on TRMM precipitation data[J]. Journal of Resources and Ecology, 2017, 8(6): 559-570.

[14] Lioubimtseva E, Cole R, Adams J M, et al. Impacts of climate and land-cover changes in arid lands of Central Asia[J]. Journal of Arid Environments, 2005, 62(2): 285-308.

[15] Huang W, Chen F H, Feng S, et al. Interannual precipitation variations in the mid-latitude Asia and their association with large-scale atmospheric circulation[J]. Chinese Science Bulletin, 2013, 58(32): 3962-3968.

[16] Yin Z Y, Wang H L, Liu X D. A comparative study on precipitation climatology and interannual variability in the lower midlatitude east Asia and Central Asia[J]. Journal of Climate, 2014, 27 (20): 7830-7848.

[17] Aizen E M, Aizen V B, Melack J M, et al. Precipitation and atmospheric circulation patterns at mid-latitudes of Asia[J]. International Journal of Climatology, 2001, 21(5): 535-556.

[18] Bothe Oliver, Fraedrich Klaus, Xiuhua Z. Precipitation climate of Central Asia and the large-scale atmospheric circulation[J]. Theoretical and Applied Climatology, 2012, 108(3-4): 345-354.

[19] Hu Z Y, Zhou Q M, Chen X, et al. Variations and changes of annual precipitation in Central Asia over the last century[J]. International Journal of Climatology, 2017, 37: 157-170.

[20] Norris J, Carvalho L M V, Jones C, et al. The spatiotemporal variability of precipitation over the Himalaya: Evaluation of one-year WRF model simulation[J]. Climate Dynamics, 2016, 49(5-6): 2179-2204.

[21] Qiu Y, Hu Q, Zhang C. WRF simulation and downscaling of local climate in Central Asia[J]. International Journal of Climatology, 2017, 37: 513-528.

[22] 辛蕊, 段克勤. 2017年夏季秦岭降水的数值模拟及其空间分布[J]. 地理学报, 2019, 74(11): 137-149. [Xin Rui, Duan Keqin. Numerical simulation and spatial distribution of summer precipitation in the Qinling Mountains[J]. Acta Geographica Sinica, 2019, 74(11): 137-149.]

[23] Xie P P, Chen M Y, Yang S, et al. A gauge-based analysis of daily precipitation over east Asia[J]. Journal of Hydrometeorology, 2007, 8(3): 607-626.

[24] Rana S, Mcgregor J, Renwick J. Wintertime precipitation climatology and ENSO sensitivity over central southwest Asia[J]. International Journal of Climatology, 2017, 37(3): 1494-1509.

[25] 田亚林. 中亚地区极端降水时空分布及重现期分析[D]. 兰州: 兰州交通大学, 2020. [Tian Yalin. Spatial-temporal distribution and return period analysis of extreme precipitation in Central Asia [D]. Lanzhou: Lanzhou Jiaotong University, 2020.]

[26] 陈淑莹, 胡琪, 张弛, 等. WRF模式在天山地区模拟能力的敏感性评估[J]. 干旱区研究, 2019, 36(1): 193-203. [Chen Shuying, Hu Qi, Zhang Chi, et al. Evaluation on the sensitivity of WRF model in the Tianshan Mountains[J]. Arid Zone Research, 2019,

36(1): 193-203.]

[27] Caves J, Bayshashov B, Zhamangara A, et al. Tracking moisture pathways to Asia since the late Cretaceous: The competing influences of westerly and monsoonal dynamics[C]//Egu General Assembly Conference Abstracts. Egu, 2016: EPSC2016-10689.

[28] Tripathee L, Guo J, Kang S, et al. Spatial and temporal distribution of total mercury in atmospheric wet precipitation at four sites from the Nepal-Himalayas[J]. Science of the Total Environment, 2018, 655: 1207-1217.

[29] 吴钩, 白爱娟. 青藏高原季风环流情况与中亚季风降水特征分析[J]. 成都信息工程大学学报, 2016, 31(1): 76-85. [Wu Gou, Bai Aijuan. Analysis on the characteristics of Tibetan Plateau's monsoon circulation and Central Asia's rainfall[J]. Journal of Chengdu University of Information Technology, 2016, 31(1): 76-85.]

[30] 史玉光, 孙照渤. 新疆水汽输送的气候特征及其变化[J]. 高原气象, 2008, 27(2): 310-319. [Shi Yuguang, Sun Zhaobo. Climate characteristics of water vapor transportation and its variation over Xinjiang[J]. Plateau Meteorology, 2008, 27(2): 310-319.]

[31] Bazhev A B, Kotlyakov V M, Varnakova G M. The problems of present-day glaciation of the Pamir-Alai[C]//Proceedings of the Moscow Symposium 1971. Wallingford: IAHS Publication, 1975, 104: 11-21.

[32] Glazyrin G E. Influences of deglaciation on the river run-off in Central Asia[J]. Lëd i Sneg, 2013: doi: 10.15356/2076-6734-2013-3-20-25.

[33] 胡汝骥, 姜逢清, 王亚俊, 等. 中亚(五国)干旱生态地理环境特征[J]. 干旱区研究, 2014, 31(1): 1-12. [Hu Ruji, Jiang Fengqing, Wang Yajun, et al. Arid ecological and geographical conditions in five countrites of Central Asia[J]. Arid Zone Research, 2014, 31(1): 1-12.]

[34] 汤懋苍. 祁连山区降水的地理分布特征[J]. 地理学报, 1985, 12(4): 323-332. [Tang Maocang. The distribution of precipitation in mountain Qilian (Nanshan)[J]. Acta Geographica Sinica, 1985, 12(4): 323-332.]

[35] 陈炯, 王建捷. 边界层参数化方案对降水预报的影响[J]. 应用气象学报, 2006, 17(增刊1): 11-17. [Chen Jiong, Wang Jianjie. Mesoscale precipitation simulation sensitivity to PBL parameterization[J]. Journal of Applied Meteorological Science, 2006, 17(Suppl. 1): 11-17.]

[36] 吕光辉, 于恩涛, 向伟玲, 等. WRF模式分辨率对新疆异常降雨天气要素模拟的影响[J]. 气候与环境研究, 2009, 14(1): 85-96. [Lü Guanghui, Yu Entao, Xiang Weiling, et al. Effect of horizontal and vertical resolution on WRF simulation of the unusual rainfall event in Xinjiang[J]. Climatic and Environmental Research, 2009, 14(1): 85-96.]

[37] 陶健红, 张新荣, 张铁军, 等. WRF模式对一次河西暴雪的数值模拟分析[J]. 高原气象, 2008, 27(1): 68-75. [Tao Jianhong, Zhang Xinrong, Zhang Tiejun, et al. Simulation and analysis of heavy snowfall in the Hexi Corridor with WRF model[J]. Plateau Meteorology, 2008, 27(1): 68-75.]

[38] 许建伟, 高艳红. WRF模式对夏季黑河流域气温和降水的模拟及检验[J]. 高原气象, 2014, 33(4): 937-946. [Xu Jianwei, Gao Yanhong. Validation of summer surface air temperature and precipitation simulation over Heihe River Basin[J]. Plateau Meteorology, 2014, 33(4): 937-946.]

[39] 陈仁升, 康尔泗, 杨建平, 等. 内陆河流域分布式日出山径流模型——以黑河干流山区流域为例[J]. 地球科学进展, 2003, 18(2): 198-206. [Chen Rensheng, Kang Ersi, Yang Jianping, et al. A distributed daily runoff model of inland river mountainous basin[J]. Advances in Earth Science, 2003, 18(2): 198-206.]

[40] 舒守娟, 王元, 李艳. 西藏高原地形扰动对其降水分布影响的研究[J]. 水科学进展, 2006, 17(5): 585-591. [Shu Shoujuan, Wang Yuan, Li Yan. Effect of topographic perturbation on the precipitation distribution in Tibetan Plateau[J]. Advances in Water Science, 2006, 17(5): 585-591.]

Characteristics of precipitation in the Pamirs in 2017 based on WRF simulation

ZHANG Qian, DUAN Keqin

(School of Geography and Tourism, Shaanxi Normal University, Xi'an 710119, Shaanxi, China)

Abstract: The Pamirs, found on the western edge of the Tibetan Plateau, spans the largest high-altitude area in Central Asia. Named the Central Asian Water Tower, this mountain range is the most important water source in Central Asia, where water resources are becoming increasingly tense. To efficiently utilize its limited water resources, researchers should elucidate the temporal and spatial changes in its atmospheric precipitation. However, the understanding of temporal and spatial variations in precipitation in the Pamirs is still insufficient mainly because of the high terrain of the Pamirs and the violent terrain undulations, resulting in the extremely limited spatial representation of observational data from a single site. Such understanding is also limited because of sparse meteorological observations and complex process of accurate precipitation data collection owing to the harsh natural environment of high-altitude mountainous areas. Consequently, atmospheric precipitation and hydrological processes in the Pamirs remain unclear. In this study, a WRF model was used to simulate and understand the temporal and spatial distribution of atmospheric precipitation in the Pamirs from December 2016 to November 2017 with a high resolution of 6 km. The re-analyzed data ERA5 and Grid data CPC were examined and compared with model results to explore the distribution characteristics of falling water centers in different resolution data. WRF simulation results exhibited good spatial correlation with CPC data, and the spatial distribution of precipitation was highly consistency. WRF restored the spatial distribution of precipitation on the plateau, and its high-resolution simulation yielded more details than other data. Simulation results further revealed the blocking effect of the Pamir's high terrain on water vapor transport, causing the seasonal precipitation of the Pamirs to be mainly concentrated on windward slopes. In winter and spring, precipitation mainly occurred on windward slopes on the west side of the Pamirs. As altitude increased, precipitation increased and remained concentrated at 3000–5000 m above sea level. Precipitation in high-altitude areas was several times that in plain areas. Summer precipitation was mainly observed in the southern foot of the Pamirs. Summer monsoon could not penetrate deep into the plateau inland because of obstruction by the plateau; thus, precipitation at the top of the plateau in summer was <100 mm.

Key words: precipitation; WRF; high elevation; Pamirs